

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_127

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ПОСЛОЙНО НАНЕСЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ
ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**SCIENTIFIC JUSTIFICATION FOR INCREASING THE DURABILITY
OF LAYER-BY-LAYER POLYMER COATINGS
OF SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT**

Канд. техн. наук А.Ю. Андриюшкин, А.С. Дубова

Ph.D. A. Yu. Andryushkin, A.S. Dubova

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Надежность и живучесть техники специального назначения зависит от состояния выполняющего различные функции полимерного покрытия. Показатели качества (прочность, теплостойкость) и функциональные свойства полимерного покрытия с течением времени ухудшаются. Поэтому актуально решение проблемы повышения долговечности полимерных покрытий. Показана взаимосвязь долговечности, рабочей температуры и действующих напряжений в полимерном покрытии, и определяющие их физические константы полимера. Разобраны причины возникновения внутренних напряжений в полимерном покрытии, а также способы их устранения. Проведен анализ влияния макроскопических концентраторов и дефектов полимерного покрытия на действующие в нем напряжения. Обоснованы эффекты, обуславливающие повышение показателей качества полимерного покрытия при его послойном нанесении. Научно обосновано повышение долговечности послойно нанесенных полимерных покрытий техники специального назначения.

Ключевые слова: полимерное покрытие, долговечность, дефектность, послойное нанесение, концентратор напряжений, внутренние напряжения.

The reliability and survivability of special-purpose equipment depends on the condition of the polymer coating performing various functions. The quality indicators (strength, heat resistance) and functional properties of the polymer coating deteriorate over time. Therefore, it is important to solve the problem of increasing the durability of polymer coatings. The relationship between durability, operating temperature, and acting stresses in a polymer coating, and the physical constants of the polymer that determine them, is shown. The analysis of the causes of internal stresses in the polymer coating, as well as ways to reduce them, is carried out. The effect of macroscopic concentrators and polymer coating defects on the stresses acting in it is analyzed. The effects that cause an increase in the quality of the polymer coating during its layered application are considered. An increase in the durability of layer-by-layer polymer coatings of special-purpose equipment has been scientifically substantiated.

Keywords: polymer coating, durability, imperfection, layer-by-layer application, stress concentrator, internal stresses.

Введение

Полимерное покрытие эксплуатируемой техники специального назначения (ТСН) постепенно стареет, изменяется его состав и структура, накапливаются и растут дефекты, оно становится неоднородным, локальные значения показателей качества покрытия значительно отличаются и, как следствие, теряются функциональные свойства. Увеличение дефектности покрытия обуславливает снижение надежности и живучести эксплуатируемой ТСН, приводит к ее отказам. Поэтому актуально решение научно-технической проблемы — повышение долговечности полимерных покрытий эксплуатируемой ТСН.

Скорость ухудшения функциональных свойств полимерного покрытия зависит от условий эксплуатации ТСН, начальной дефектности покрытия, его однородности по составу и структуре, обусловленной технологией нанесения, а также величины внутренних (остаточных) напряжений.

Снижение дефектности, повышение однородности покрытия и уменьшение внутренних напряжений достигается послойным нанесением покрытия на основу (подложку), то есть его формируют последовательным нанесением единичных слоев. Поэтому требуется научное обоснование повышения долговечности полимерного покрытия за счет его послойного нанесения [1–7].

Целью исследования является научное обоснование повышения долговечности послойно нанесенных полимерных покрытий техники специального назначения.

Задачи исследования:

- установление взаимосвязи показателей качества полимерного покрытия — долговечности, рабочей температуры, действующих напряжений;
- анализ причин возникновения напряжений в покрытии и путей их уменьшения;
- анализ влияния макроскопических концентраторов и дефектов полимерного покрытия на действующие в нем напряжения;
- обоснование эффектов, обуславливающих повышение показателей качества полимерного покрытия при его послойном нанесении.

Взаимосвязь долговечности, рабочей температуры и действующих напряжений в полимерном покрытии

Долговечность полимеров может быть оценена с помощью кинетической или термофлуктуационной теории, разработанной С.Н. Журковым [8–11]. Деформирование полимера, возникновение и развитие в нем дефектов, прежде всего, микротрещин, обусловлено тепловым движением атомов. Формула С.Н. Журкова для оценки долговечности t включает напряжения в полимерном покрытии σ_{mn} и рабочую температуру T [8–11]:

$$t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma_{mn}}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где t — долговечность, с;

t_0 — период колебания атомов в твердом теле, с;

U_0 — максимальная энергия активации разрушения химических и межмолекулярных связей, кДж/моль;

σ_{mn} — действующие напряжения в полимерном покрытии, МПа;

γ — структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа);

R — универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);

T — рабочая температура, К.

В формулу (1) Ратнером С.Б. и Ярцевым В.П. была введена константа T_m [8–11]:

$$t = t_m \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma_{mn}}{R \cdot (T - T_m)}\right), \quad (2)$$

где t_m — минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц — атомов, групп атомов, сегментов), с;

T_m — предельная температура существования полимера (температура разложения или термодеструкция), К.

Из выражения (2) можно определить взаимосвязанные значения показателей качества (долговечность, действующие напряжения, теплостойкость) полимерного покрытия [8–11]:

$$t = t_m \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma_{mn}}{R \cdot T} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_m}\right)\right), \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{пп}} = \frac{1}{\gamma} \cdot \left(U_0 - \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{1 - \frac{T}{T_m}} \cdot \lg \left(\frac{t}{t_m} \right) \right), \quad (4)$$

$$T = \left(\frac{1}{T_m} + \frac{2,3 \cdot R}{U_0 - \gamma \cdot \sigma_{\text{пп}}} \cdot \lg \left(\frac{t}{t_m} \right) \right)^{-1}. \quad (5)$$

Анализ выражений (2)–(5) показывает, что рост долговечности покрытия возможен при изменении характеризующих материал физических констант T_m , t_m , U_0 , γ , а именно, увеличении T_m , t_m , U_0 и снижении γ . Для достижения максимальных значений T_m , t_m , U_0 и минимального значения γ технология нанесения полимерного покрытия на основу (подложку) должна обеспечивать его высокую однородность по составу и структуре, а также низкую дефектность, характеризующуюся малым числом допустимых производственных дефектов. Также на значение константы γ влияет масштабный фактор — чем больше толщина полимерного покрытия, тем выше вероятность появления дефектов, имеющих значительные размеры, в том числе, недопустимых дефектов. Крупные дефекты являются макроскопическими концентраторами напряжений, и обуславливают снижение прочности полимерного покрытия. То есть с увеличением толщины полимерного покрытия снижается его однородность и повышается дефектность, что обуславливает рост константы γ .

Действующие в полимерном покрытии напряжения

Возникающие в полимерном покрытии напряжения $\sigma_{\text{пп}}$ [12–15]:

$$\sigma_{\text{пп}} = \sigma_{\text{эkv}} + \sigma_{\text{вн}} > [\sigma],$$

где $\sigma_{\text{пп}}$ — напряжения в полимерном покрытии, Па;

$\sigma_{\text{эkv}}$ — эквивалентные напряжения в полимерном покрытии от приложенной внешней нагрузки, Па;

$\sigma_{\text{вн}}$ — внутренние (остаточные) напряжения в полимерном покрытии, Па;

$[\sigma]$ — допустимые напряжения растяжения для материала полимерного покрытия, Па.

Например, эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{эkv}}$ в покрытии, нанесенном на трубу [13–15]:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{\sigma_{\text{к}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 - \sigma_{\text{к}} \cdot \sigma_{\text{пр}} + 3 \cdot \tau^2},$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — продольные напряжения в полимерном покрытии, Па;

$\sigma_{\text{к}}$ — кольцевые напряжения в полимерном покрытии, Па;

τ — касательные напряжения в полимерном покрытии, Па.

Внутренние напряжения в полимерном покрытии являются результатом усадки композиции при отверждении (усадочные напряжения σ_y), а так же при изменениях температуры из-за различия коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) основы (подложки) и полимера (температурные напряжения σ_t) [13–15]:

$$\sigma_{\text{вн}} = \sigma_y + \sigma_t,$$

где σ_y — усадочные напряжения, Па;

σ_t — температурные напряжения, Па.

Усадочные напряжения можно определить по выражению [13–15]:

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon \cdot E_{\text{п}}}{1 - \mu}, \quad (6)$$

где ε — относительная усадка полимерной композиции;

$E_{\text{п}}$ — модуль упругости полимера, Па;

μ — коэффициент Пуассона.

Относительная линейная усадка композиции определяется по выражению [13–15]:

$$\varepsilon = \chi \cdot \Delta C = \frac{h_{\text{yc}}}{h_{\text{пм}}}, \quad (7)$$

где χ — коэффициент усадки композиции;

ΔC — уменьшение концентрации растворителя в композиции при отверждении;

h_{yc} — абсолютная усадка (величина уменьшения толщины) композиции при отверждении, м;

$h_{\text{пм}}$ — толщина полимерной массы, м.

Энергия упругой деформации покрытия $W_{\text{упр}}$ пропорциональна его объему $V_{\text{п}}$ [13–15]:

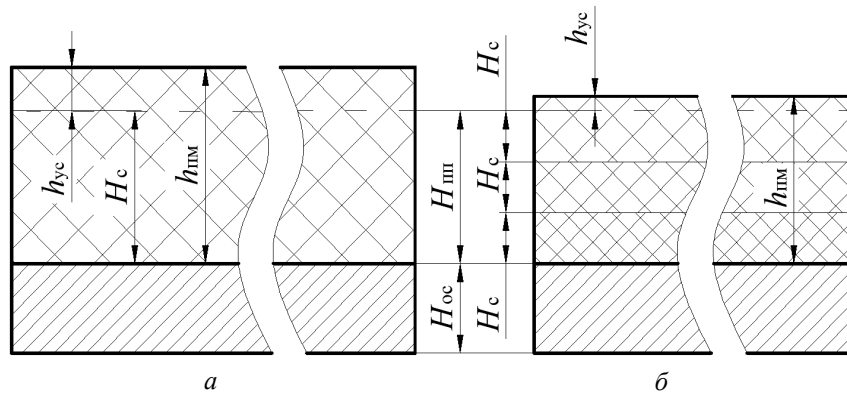


Рис. Полимерное покрытие: а — однослойное; б — трехслойное; $H_{пм}$ — толщина отвержденного полимерного покрытия; H_c — толщина отвержденного единичного слоя полимерного покрытия; $h_{пм}$ — толщина полимерной массы; h_{yc} — абсолютная усадка (величина уменьшения толщины) слоя полимерной композиции при отверждении; $H_{оc}$ — толщина основы (подложки)

$$W_{упр} = \frac{2 \cdot G_{п} \cdot (1 + \mu) \cdot \varepsilon^2 \cdot V_{п}}{1 - \mu}, \quad (8)$$

где $G_{п}$ — модуль сдвига полимера, Па;

$V_{п}$ — объем полимера, м³;

$W_{упр}$ — энергия упругой деформации полимера, Дж.

Из анализа выражений (6)–(8) следует, что величина усадочных напряжений в полимерном покрытии зависит от величины относительной усадки композиции ε при отверждении. Снижение усадочных напряжений возможно путем перехода от отверждения композиции во всем объеме покрытия (рис., а) к последовательному отверждению этого объема по частям (рис., б), то есть к многослойному нанесению покрытия [16–19].

При отверждении всего объема композиции однослойного покрытия толщиной $H_{пм} = H_c$ (рис., а) величина абсолютной усадки $h_{yc} = h_{пм} - H_{пм}$ значительна, при этом возникает существенная относительная линейная усадка композиции ε , обуславливающая высокие усадочные напряжения σ_y .

При отверждении полимерной массы, например, трехслойного покрытия толщиной $H_{пм} = 3H_c$ (рис., б) уменьшение величины абсолютной усадки единичного слоя пропорционально числу слоев, при этом усадка наблюдается только в нанесенном единичном слое композиции, а возникающие при этом усадочные напряжения σ_y незначительны, так как перерас-

пределяются на нижележащие единичные слои. Каждый последующий единичный слой композиции наносится на предыдущий, в котором процесс усадки практически завершен, а процесс отверждения близок к завершению. Таким образом, относительная усадка композиции ε уменьшается с увеличением числа нанесенных единичных слоев и становится минимальной при нанесении последнего единичного слоя.

Чем меньше толщина наносимого единичного слоя, тем его состав и структура однороднее, так как физические и химические процессы отверждения проходят более полно, например, возрастает степень полимеризации — число мономерных звеньев в молекуле полимера [19]. Следовательно, при одинаковой толщине многослойное покрытие по сравнению с однослойным покрытием характеризуется низкими усадочными напряжениями и высокой однородностью состава и структуры (рисунок).

Температурные напряжения σ_t в полимерном покрытии [15]:

$$\sigma_t = \frac{(\alpha_{п} - \alpha_{оc}) \cdot \Delta T \cdot E_{п}}{1 - \mu},$$

где ΔT — изменение рабочей температуры, К;

$\alpha_{п}$ и $\alpha_{оc}$ — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) полимера и основы (подложки), К⁻¹.

Релаксация внутренних напряжений при отверждении обусловлена наличием у полиме-

ров пластической и высокоэластической деформации, а так же перестройкой надмолекулярных структур. Внутренние напряжения максимальны в адгезионном слое и постепенно убывают по толщине покрытия к его поверхности. При значительных внутренних напряжениях их релаксация может сопровождаться появлением микротрещин и отслоением покрытия от основы. Условие возникновения микротрещин $\sigma_{\text{вн}} > [\sigma]$. Условие возникновения отслоения покрытия от основы

$$\tau_{\text{вн}} > [\tau],$$

где $\tau_{\text{вн}}$ — касательные напряжения в адгезионном слое, Па;

$[\tau]$ — допустимые касательные напряжения в адгезионном слое, Па.

При зарождении и росте дефекта в единичном слое многослойного покрытия, релаксация возникающих вокруг него напряжений осуществляется соседними слоями, которые поглощают и рассеивают освобождающуюся кинетическую энергию при термофлуктуационном разрыве связей полимера. Таким образом, в многослойном полимерном покрытии наблюдается «эффект блокировки» развивающегося дефекта.

Высокие значения внутренних напряжений обуславливают появление дефектов, в частности, трещин. В работе [20] предложен характеризующий устойчивость покрытия к образованию трещин безразмерный критерий трещинообразования:

$$\Omega \geq \frac{H_{\text{пп}} \cdot \sigma_{\text{вн}}^2}{G_{\text{lc}} \cdot E_{\text{п}}}, \quad (9)$$

где Ω — критерий трещинообразования;

$H_{\text{пп}}$ — толщина отвержденного полимерного покрытия, м;

G_{lc} — критическая скорость высвобождения энергии при трещинообразовании в полимерном покрытии, Дж/м².

Если значение критерия трещинообразования $\Omega \geq 2$, то в полимерном покрытии появляются трещины. Из выражения (9) следует, что с увеличением толщины покрытия и действующих в нем внутренних напряжений вероятность появления дефектов растет.

Дефекты — концентраторы напряжений в полимерном покрытии

Дефекты являются концентраторами напряжений и способствуют ускоренному разрушению полимерного покрытия. Концентрация напряжений в образце характеризуется теоретическим коэффициентом концентрации напряжений [21]:

$$k_{\text{т}\sigma} = \frac{\sigma_{\text{тmax}}}{\sigma_{\text{тном}}},$$

где $k_{\text{т}\sigma}$ — теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$\sigma_{\text{тmax}}$ — теоретически максимальное напряжение, обусловленное наличием макроскопического концентратора, Па;

$\sigma_{\text{тном}}$ — теоретически номинальное напряжение (макроскопический концентратор отсутствует), Па.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений отражает лишь влияние формы и размеров макроскопического концентратора на величину местных напряжений в нагруженном образце. Считается, что материал образца идеально однородный.

Реальное полимерное покрытие неоднородно, его прочность меньше по сравнению с идеальным бездефектным материалом. Поэтому действительное повышение напряжений при наличии макроскопического концентратора в покрытии определяют экспериментально и характеризуют эффективным коэффициентом концентрации напряжений [21]:

$$k_{\text{э}\sigma} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ном}}},$$

где $k_{\text{э}\sigma}$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений;

σ_{max} — действительное максимальное напряжение, обусловленное наличием макроскопического концентратора, Па;

$\sigma_{\text{ном}}$ — действительное номинальное напряжение (макроскопический концентратор отсутствует), Па.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий влияние макроскопического концентратора, можно определить по выражению [21]:

$$k_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} \cdot (k_{\tau\sigma} - 1), \quad (10)$$

где q_{σ} — коэффициент чувствительности материала образца к макроскопическому концентратору ($0 \leq q_{\sigma} \leq 1$).

Разрушению полимерного покрытия с макроскопическим концентратором способствует циклическое нагружение, вызванное периодически изменяющимися механическими или температурными нагрузками. Влияние концентратора на предел выносливости (усталости) полимерного покрытия учитывается коэффициентом [21]:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} = \left(\frac{k_{\sigma\sigma}}{k_{\sigma\phi}} + \frac{1}{k_{\sigma\kappa}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{k_{\sigma\psi} \cdot k_{\sigma\text{ан}}}, \quad (11)$$

где k_{σ} — коэффициент снижения предела выносливости;

σ_{-1} — предел выносливости полимерного покрытия без макроскопического концентратора, Па;

σ_{-1k} — предел выносливости полимерного покрытия с макроскопическим концентратором, Па;

$k_{\sigma\phi}$ — коэффициент, учитывающий масштабный фактор, то есть влияние абсолютных размеров образца покрытия;

$k_{\sigma\kappa}$ — коэффициент, учитывающий качество поверхности покрытия;

$k_{\sigma\psi}$ — коэффициент, учитывающий поверхностное упрочнение покрытия;

$k_{\sigma\text{ан}}$ — коэффициент, учитывающий анизотропию материала покрытия.

Влияние масштабного фактора учитывается коэффициентом [21]:

$$k_{\sigma\phi} = \frac{\sigma_{-1L\max}}{\sigma_{-1L\min}}, \quad (12)$$

где $\sigma_{-1L\max}$ — предел выносливости образца покрытия с максимальными размерами, Па;

$\sigma_{-1L\min}$ — предел выносливости образца покрытия с минимальными размерами, Па.

Влияние качества поверхности покрытия учитывается коэффициентом [21]:

$$k_{\sigma\kappa} = \frac{\sigma_{-1Rz\max}}{\sigma_{-1Rz\min}}, \quad (13)$$

где $\sigma_{-1Rz\max}$ — предел выносливости образца покрытия с максимальной шероховатостью поверхности, Па;

$\sigma_{-1Rz\min}$ — предел выносливости образца покрытия с минимальной шероховатостью поверхности, Па.

Влияние поверхностного упрочнения покрытия учитывается коэффициентом [21]:

$$k_{\sigma\psi} = \frac{\sigma_{-1\delta\max}}{\sigma_{-1\delta\min}}, \quad (14)$$

где $\sigma_{-1\delta\max}$ — предел выносливости поверхностно упрочненного образца покрытия, Па;

$\sigma_{-1\delta\min}$ — предел выносливости образца покрытия без упрочнения поверхности, Па.

Влияние анизотропии свойств покрытия учитывается коэффициентом [21]:

$$k_{\sigma\text{ан}} = \frac{\sigma_{-1//}}{\sigma_{-1\perp}}, \quad (15)$$

где $\sigma_{-1//}$ — предел выносливости вдоль образца покрытия, Па;

$\sigma_{-1\perp}$ — предел выносливости поперек образца покрытия, Па.

Из анализа выражений (11)–(15) следует, что предел выносливости (усталости) полимерного покрытия зависит от следующих факторов:

- статистический фактор — вероятность появления опасного дефекта, являющегося макроскопическим концентратором напряжений (в толстом покрытии выше, чем в тонком);

- материаловедческий фактор — неоднородность состава и структуры полимерного покрытия возрастает с ростом его толщины;

- технологический фактор — неоднородность состава и структуры полимерного покрытия обусловлена возможностями технологического метода по диспергированию и гомогенизации его компонентов при нанесении на основу (подложку).

Многослойное полимерное покрытие характеризуется пониженной дефектностью и повышенной однородностью состава и структуры по сравнению с однослойным покрытием такой же толщины. Следовательно, уменьшается значение эффективного коэффициента концентрации напряжений k_{σ} и коэффициента снижения предела выносливости k_{σ} . Послойное нанесение

полимерного покрытия необходимой толщины снижает влияние перечисленных выше факторов на его прочность. Вероятность появления опасных дефектов, представляющих собой макроскопические концентраторы напряжений, в многослойных покрытиях крайне мала, так как крупноразмерный дефект не может сформироваться сразу в нескольких соседних единичных слоях, наносимых последовательно.

Заключение

Повышение долговечности полимерного покрытия достигается вследствие действия следующих эффектов, вызванных послойным нанесением.

1. Малая толщина единичного слоя полимерного покрытия обеспечивает высокую степень физико-химических взаимодействий нанесенных компонентов полимерной композиции, например, полимеризации, и упорядоченность надмолекулярной структуры.

2. Снижение внутренних напряжений в многослойном полимерном покрытии достигается уменьшением величины относительной усадки единичного слоя полимерной композиции при отверждении.

3. Повышение однородности состава и структуры многослойного полимерного покрытия наблюдается вследствие снижения его дефектности, так как происходит «залечивание» поверхностных дефектов предыдущего отвержденного слоя материалом наносимого последующего слоя.

4. В многослойном полимерном покрытии размер опасного дефекта не может превышать толщину единичного слоя, следовательно, возникновение крупноразмерного макроскопического концентратора напряжений маловероятно.

5. В многослойном покрытии наблюдается «эффект блокировки» — интенсивная релаксация напряжений от развивающегося дефекта происходит в соседних слоях.

Долговечность полимерного покрытия техники специального назначения повышается вследствие применения послойного нанесения, так как достигается однородность состава и структуры покрытия, снижается его дефектность. Это выражается в улучшении показателей качества полимерного покрытия и стабильности функциональных свойств.

Список источников

1. Суходоля А.В., Одиноква И.В., Птицын Д.А. Прогнозирование долговечности лакокрасочных покрытий при эксплуатации транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2015. № 3. С. 35–37.

2. Федюк Р.С. Долговечность различных марок строительного пенополистирола // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 5 (99). С. 143–148.

3. Потапчик А.Н., Егорова А.Л. Разработка метода прогнозирования долговечности антикоррозионных лакокрасочных покрытий // Труды БГТУ. Сер. 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 175–186.

4. Гимранов И.Р., Федяев В.Л., Галимов Э.Р. Оценка ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий // Вестник Югорского государственного университета. 2021. № 3 (62). С. 11–18.

5. Петров А.А., Садиев У.В. Прогнозирование долговечности конструкций ГТС с антикоррозионным и герметизирующим покрытием // Гидротехника. 2019. № 3 (56). С. 76–77.

6. Андрияшкин А.Ю., Буцкин Е.Б., Кадочникова Е.Н. Прогнозирование срока службы антикоррозионных покрытий металлических конструкций объектов переработки, хранения и транспортировки углеводородов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 79–88.

7. Андрияшкин А.Ю., Кадочникова Е.Н., Пенев М.В. Прогнозирование сплошности маскировочных лакокрасочных покрытий вооружения и военной техники // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. 2024. № 4 (34). С. 135–144.

8. Ярцев В.П., Лысенко Н.В. Влияние температуры и нагрузки на долговечность пенополиуретана // Пластические массы. 2006. № 2. С. 26–27.

9. Ярцев В.П., Ерофеев А.В., Попов М.А. Влияние размера наполнителя из стекла на долговечность полистирола // Пластические массы. 2019. № 5–6. С. 33–35.

10. Ярцев В.П., Данилов В.М., Сучков К.О. Влияние наполнителей на долговечность битумных композитов // Строительные материалы,

оборудование, технологии XXI века. 2025. № 1 (288). С. 62–65.

11. Ярцев В.П., Монастырев П.В., Мамонтов А.А. и др. Долговечные теплоизоляционные пенополистирольные изделия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 7 (751). С. 50–63.

12. Долгов Н.А., Букетова Н.Н., Бесов А.В. Сравнение различных методов определения остаточных напряжений в полимерных покрытиях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 3. № 7 (57). С. 40–42.

13. Быков И.Ю., Бердник М.М., Пак А.Л. Оценка внутренних напряжений при нанесении полимерных покрытий на стальные трубы с применением автоматизированного алгоритма // Инженер-нефтяник. 2014. № 4. С. 38–44.

14. Корягин С.И. Оптимизация остаточных напряжений в полимерных покрытиях // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. № 3. С. 100–104.

15. Яснов В.Б., Шаповалов В.М. Температурные напряжения при нанесении полимерного покрытия на трубу // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 1 (61). С. 61–65.

16. Сергеевичев А.В., Онегин В.И. Физико-химические основы процессов формирования полимерных покрытий на твердой поверхности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 213–227.

17. Новоселова И.В., Патютко А.П. Обобщенная оценка свойств лакокрасочного покрытия // Лесотехнический журнал. 2013. № 3 (11). С. 99–103.

18. Головин В.А. Многослойные защитные полимерные покрытия. Обеспечение сплошности // Коррозия: материалы, защита. 2006. № 2. С. 28–36.

19. Андрияшкин А.Ю., Пелех М.Т., Кадочникова Е.Н. Исследование и разработка средств и методов, обеспечивающих снижение пожарной опасности нефтеперерабатывающего оборудования // Проблемы управления рисками в техносфере. 2017. № 2 (42). С. 89–96.

20. Hutchinson J.W. Stresses and failure modes in thin films and multilayers. Notes for a DCAMM course // Technical University of Denmark, October 1996. P. 3.

21. Махутов Н.А. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения; под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М.: ЛЕНАНД, 2018. 720 с.

References

1. Sukhodolya A.V., Odinkova I.V., Ptit-syn D.A. Forecasting the durability of paint coatings during the operation of transport vehicles // Construction and road vehicles. 2015. No 3. Pp. 35–37.

2. Fedyuk R.S. Durability of various grades of construction expanded polystyrene // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2013. No 5 (99). Pp. 143–148.

3. Potapchik A.N., Egorova A.L. Development of a method for predicting the durability of anti-corrosive paint coatings // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geocology. 2021. No 2 (247). Pp. 175–186.

4. Gimranov I.R., Fedyaev V.L., Galimov E.R. Evaluation of the resource of functional polymer powder coatings // Bulletin of the Ugra State University. 2021. No 3 (62). Pp. 11–18.

5. Petrov A.A., Sadiev U.V. Forecasting the durability of GTS structures with anticorrosive and sealing coating // Hydraulic Engineering. 2019. No 3 (56). Pp. 76–77.

6. Andryushkin A.Yu., Bukikin E.B., Kadochnikova E.N. Forecasting the service life of anti-corrosive coatings of metal structures of objects of processing, storage and transportation of hydrocarbons // Problems of risk management in the technosphere. 2023. No 3 (67). Pp. 79–88.

7. Andryushkin A.Yu., Kadochnikova E.N., Penev M.V. Forecasting the continuity of camouflage coatings of weapons and military equipment // Scientific problems of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation. 2024. No 4 (34). Pp. 135–144.

8. Yartsev V.P., Lysenko N.V. Influence of temperature and load on the durability of polyurethane foam // Plastic masses. 2006. No 2. Pp. 26–27.

9. Yartsev V.P., Erofeev A.V., Popov M.A. The influence of the size of glass filler on the durability of polystyrene // Plastic masses. 2019. No 5–6. Pp. 33–35.

10. Yartsev V.P., Danilov V.M., Suchkov K.O. The influence of fillers on the durability of bitu-

men alloys // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. 2025. No 1 (288). Pp. 62–65.

11. Yartsev V.P., Monastirev P.V., Mamontov A.A. et al. Durable thermal insulation polystyrene foam products // News of higher educational institutions. Construction. 2021. No 7 (751). Pp. 50–63.

12. Dolgov N.A., Buketova N.N., Besov A.V. Comparison of various methods for determining residual stresses in polymer coatings // East European Journal of Advanced Technologies. 2012. Vol. 3. No 7 (57). Pp. 40–42.

13. Bykov I.Yu., Berdnik M.M., Pak A.L. Assessment of internal stresses when applying polymer coatings to steel pipes using an automated algorithm // An oil engineer. 2014. No 4. Pp. 38–44.

14. Koryagin S.I. Optimization of residual stresses in polymer coatings // Bulletin of the I. Kant Russian State University. 2007. No 3. Pp. 100–104.

15. Rjasnov V.B., Shapovalov V.M. Temperature stresses when applying a polymer coating to a pipe // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2010. No 1 (61). Pp. 61–65.

16. Sergeevichev A.V., Onegin V.I. Physico-chemical bases of polymer coating formation processes on a solid surface // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2018. Issue 223. Pp. 213–227.

17. Novoselova I.V., Patyutko A.P. Generalized assessment of paint and varnish coating properties // Forestry engineering magazine. 2013. No 3 (11). Pp. 99–103.

18. Golovin V.A. Multilayer protective polymer coatings. Ensuring continuity // Corrosion: materials, protection. 2006. No 2. Pp. 28–36.

19. Andryushkin A.Y., Pelekh M.T., Kadochnikova E.N. Research and development of tools and methods to reduce the fire hazard of oil refining equipment // Problems of risk management in the technosphere. 2017. No 2 (42). Pp. 89–96.

20. Hutchinson J.W. Stresses and failure modes in thin films and multilayers. Notes for a DCAMM course // Technical University of Denmark, October 1996. P. 3.

21. Makhutov N.A. Problems of strength, technogenic safety and structural materials science: ed. by N.A. Makhutov, Yu.G. Matvienko, A.N. Romanov. Moscow: LENAND, 2018. 720 p.